

# Скоростная модуляция поперечно-модового состава лазерных пучков с помощью дифракционных оптических элементов на основе $\text{LiNbO}_3$

А.А. Есин<sup>1</sup>, А.Р. Ахматханов<sup>1</sup>, В.С. Павельев<sup>2,3</sup>, В.Я. Шур<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620000, Россия, г. Екатеринбург, пр. Ленина, д. 51,

<sup>2</sup> ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,

<sup>3</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34

## Аннотация

На основе нелинейно-оптических сегнетоэлектрических монокристаллов создан и исследован дифракционный оптический элемент, предназначенный для скоростной модуляции поперечно-модового состава пучка, формируемого из освещающего Гауссова пучка лазера.

**Ключевые слова:** электрооптический модулятор, сегнетоэлектрик, ниобат лития, доменная структура, поперечно-модовый состав.

**Цитирование:** Есин, А.А. Скоростная модуляция поперечно-модового состава лазерных пучков с помощью дифракционных оптических элементов на основе  $\text{LiNbO}_3$  / А.А. Есин, А.Р. Ахматханов, В.С. Павельев, В.Я. Шур // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 2. – С. 222-226. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-786.

**Citation:** Esin AA, Akhmatkhanov AR, Pavelyev VS, Shur VY. Tunable  $\text{LiNbO}_3$ -based diffractive optical element for the control of transverse modes of the laser beam. Computer Optics 2021; 45(2): 222-226. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-786.

## Введение

Развитие оптических телекоммуникационных технологий стимулирует исследование подходов к увеличению информационной емкости каналов оптической связи. Известен подход, основанный на использовании различных длин волн (*Wavelength Division Multiplexing*) для реализации отдельных каналов связи [1]. Было также предложено [2, 3] использовать независимое распространение поперечных мод оптического волновода для увеличения количества каналов волоконно-оптической системы связи (*Mode Division Multiplexing*). Для формирования лазерных пучков с заданным поперечно-модовым составом, а также для детектирования заданной моды в освещающем пучке было предложено использовать дифракционные оптические элементы (ДОЭ) [3, 4] и рассмотрены методы расчета и технологии изготовления таких элементов [4]. Было приведено экспериментальное исследование модели двухканальной системы связи в свободном пространстве, основанной на селекции мод Гаусса–Эрмита (1,0) и Гаусса–Эрмита (0,1) [5]. В работе [6] рассмотрено формирование поляризационно-неоднородного пучка на основе комбинации одномодовых пучков Гаусса–Эрмита (1,0) и Гаусса–Эрмита (0,1), предварительно сформированных пространственным модулятором света с сегментированной апертурой.

Следует отметить, что амплитудно-фазовое распределение в сечении моды Гаусса–Эрмита (1,0) хорошо аппроксимирует амплитудно-фазовое распределение в сечении линейно-поляризованной моды LP11

ступенчатого цилиндрического волокна [7, 8]. Это обстоятельство позволило успешно использовать элементы, предназначенные для формирования моды Гаусса–Эрмита (1,0), для эффективного возбуждения моды LP11 кварцевого ступенчатого волокна [9]. Было показано, что для формирования мод низкого порядка из освещающего Гауссова пучка может быть использован бинарный (двухуровневый) фазовый ДОЭ с фазовой функцией пропускания, соответствующей фазовому портрету формируемой моды [7, 8]. При этом такой элемент позволяет формировать заданную моду из освещающего Гауссова пучка с энергетической эффективностью более 80% [8]. Однако нерешенной оставалась проблема модуляции полученных одномодовых пучков сигналами независимых каналов передачи информации. Время быстрого действия современных жидкокристаллических пространственных модуляторов света составляет от сотен [10] до единиц миллисекунд [11], что недостаточно для применения в реальных волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС), где скорости передачи информации лежат в пределах от сотен Гбит/с до Тбит/с. Рассмотренные в [12, 13] микрзеркальные модуляторы обладают быстрым действием порядка сотен кГц.

Предложенный в [14] вариант решения проблемы требует усложнения оптической схемы и включения в нее дополнительного лазерного диода.

В данной работе предложено совместить в бинарном (т.е. фаза может принимать одно из двух значений – 0 или  $\pi$ ) фазовом элементе функции формирования моды Гаусса–Эрмита (1,0) (или (0,1)) из освещающего Гауссова пучка и скоростной модуляции.

Для реализации элемента, способного формировать фазовый сдвиг, равный  $\pi$ , между двумя половинами сечения освещающего пучка при подаче управляющего сигнала (рис. 1) предложено использовать сегнетоэлектрик со статической доменной структурой заданной геометрии [15]. Стоит отметить, что быстроедействие таких элементов может достигать десятков ГГц и зачастую ограничено источником управляющего напряжения [16].

В качестве освещающего пучка рассматривался Гауссов пучок с волновым фронтом, близким к плоскому. Если скорость модуляции такого элемента будет близка к скорости передачи информации в одном канале ВОЛС, то его можно использовать в многоканальной системе передачи информации, основанной на селекции мод Гаусса–Эрмита, выбрав в качестве волновода градиентное оптическое волокно с параболическим профилем [4], или линейно-поляризованных мод (LP-мод) в случае выбора слабонаправляющих ступенчатых маломодовых волокон, как в [9].

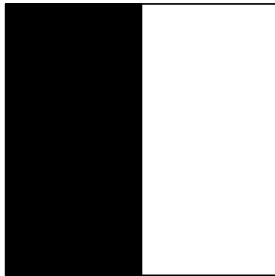


Рис. 1. Фазовая функция элемента  
(белый цвет соответствует фазе  $\pi$ , чёрный цвет – 0)

#### Экспериментальное исследование созданного элемента

Известны работы по использованию анизотропных материалов для изготовления ДОЭ [17–20].

В данной работе для реализации ДОЭ, совмещающего функции формирования моды Гаусса–Эрмита (1,0) из Гауссова пучка и модуляции модового состава, были использованы пластины одноосного сегнетоэлектрика ниобата лития конгруэнтного состава (CLN) со статической доменной структурой, соответствующей требуемой фазовой функции. В нецентросимметричных материалах показатель преломления изменяется во внешнем электрическом поле за счет эффекта Поккельса (линейного электрооптического эффекта) [16]. Знак изменения показателя преломления определяется направлением электрического поля относительно полярной оси кристалла [16]. В сегнетоэлектриках направление полярных осей (спонтанной поляризации) может быть инвертировано приложением внешнего поля [16]. При переключении поляризации монодоменный образец разбивается на домены, представляющие собой области с однородным направлением спонтанной поляризации. Активно развиваемые в настоящее время методы доменной инженерии позволяют создавать в монокристалличе-

ских сегнетоэлектриках статические доменные структуры заданной геометрии [21]. В одноосных сегнетоэлектриках направление полярных осей в соседних доменах инвертируется друг относительно друга. Поэтому в однородном электрическом поле за счет эффекта Поккельса показатель преломления в доменах с одним направлением спонтанной поляризации увеличивается на величину  $\Delta n$ , а в доменах с противоположным направлением спонтанной поляризации – уменьшается на ту же величину.

Принцип работы предлагаемого ДОЭ на основе сегнетоэлектрического монокристалла заключается в следующем. В пластине сегнетоэлектрика, вырезанной перпендикулярно полярной оси, создается доменная структура, соответствующая требуемой фазовой функции элемента. Созданная доменная структура закрепляется путем температурного отжига и остаётся неизменной в процессе работы элемента. Управляющее напряжение подается через однородные прозрачные электроды. В электрическом поле между соседними доменами возникает разница показателя преломления, равная удвоенному значению  $\Delta n$ , что позволяет управлять величиной фазового сдвига.

Доменная структура в пластине CLN толщиной 0,5 мм создавалась методом, широко применяемым для изготовления периодически поляризованных кристаллов [21]. На Z+ полярной поверхности методом фотолитографии создавалась маска из задубленного фоторезиста (AZ1518, MicroChemical). Затем к полярным поверхностям через жидкие электроды прикладывался одиночный прямоугольный импульс высокого напряжения, длительность и амплитуда которого были подобраны таким образом, чтобы переключение поляризации происходило только в областях, не покрытых фоторезистом. После удаления фоторезиста на полярные поверхности методом магнетронного распыления наносились сплошные прозрачные электроды из оксида индия-олова (ITO) толщиной 250 нм. Для уменьшения остаточных встроенных полей производился отжиг образцов с короткозамкнутыми электродами при температуре 150°C в течение 5 часов. Полученные элементы монтировались в оправу с высоковольтными выводами для подачи управляющего напряжения (рис. 2).

Оптическая схема эксперимента приведена на рис. 3а. В качестве источника излучения использовался гелий-неоновый лазер ЛГН-1 (ОАО НИИ ГРП «Плазма», Рязань) с длиной волны  $\lambda = 0,6328$  мкм. Распределение интенсивности в дальней зоне регистрировалось с помощью ПЗС-матрицы Ophir FX-50 (Ophir Photonics, Израиль), расположенной в фокусе линзы ( $F = 30$  см). На оптическом пути лазера располагался тестируемый элемент, на который с помощью платы ввода-вывода NI 6251 и высоковольтного усилителя Trek 10/10B HS (Trek Co, США) подавалось управляющее напряжение. Рабочая апертура элемента составляла 3 мм, размер луча лазера на элементе  $4\sigma = 0,48$  мм.

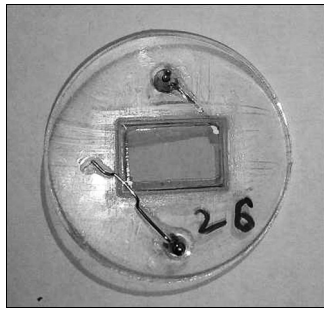


Рис. 2. Дифракционный оптический элемент в сборе с держателем и высоковольтными выводами

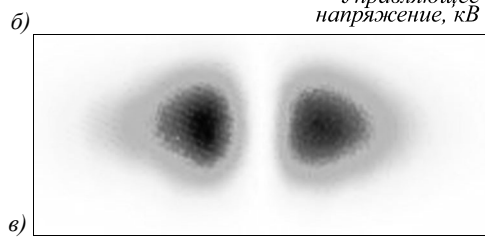
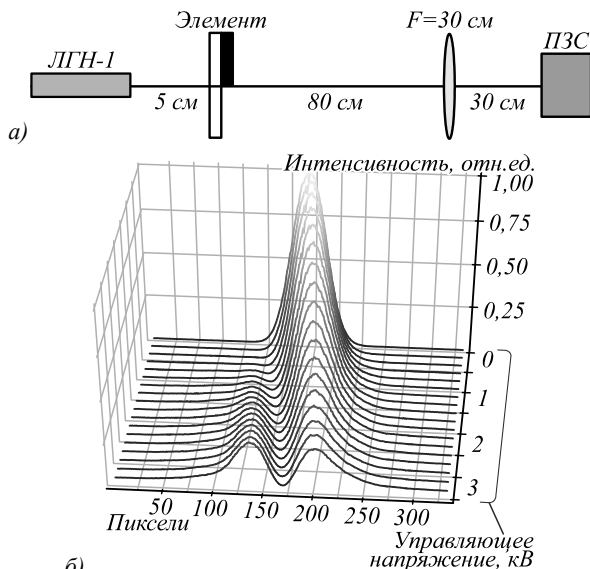


Рис. 3. Схема оптического эксперимента (а); профиль распределения интенсивности лазерного излучения в дальней зоне в зависимости от управляющего напряжения (б); распределение интенсивности при управляющем напряжении 3400 В соответствует моде Гаусса–Эрмита (0,1) (негативное изображение) (в)

Зависимость профиля распределения интенсивности лазерного излучения в дальней зоне от величины управляющего напряжения представлена на рис. 3б. Показано, что при напряжении 3400 В распределение интенсивности становится симметричным и соответствует моде Гаусса–Эрмита (0,1) (рис. 3в). Незначительное отклонение величины полуволнового напряжения от опубликованного [22] обусловлено наличием остаточного деполаризующего поля в переключенной области образца [23].

Для оценки модового состава сформированного пучка использовался подход, подобный подходу, описанному в [5]. На оптическом пути между элементом и линзой размещался второй элемент, аналогичный выше рассмотренному (с фазовой функцией,

приведенной на рис. 1), но повернутый на 90 градусов. Приложение полуволнового напряжения к элементам приводило к формированию в выходной плоскости в дальней зоне распределения интенсивности, представленного на рис. 4.

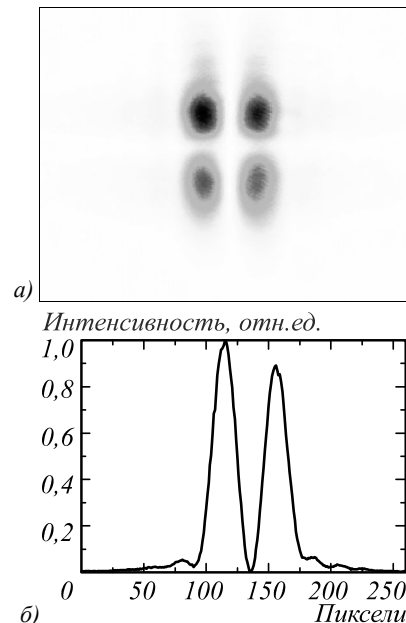


Рис. 4. Распределение интенсивности в дальней зоне в случае добавления второго элемента, повернутого на 90° (негативное изображение) (а); профиль распределения интенсивности лазерного излучения в дальней зоне в случае добавления второго элемента, повернутого на 90° (б)

Экспериментальные результаты, приведенные на рис. 4а, б, находятся в качественном соответствии с численными и экспериментальными результатами, приведенными в [5], и свидетельствуют о формировании созданным элементом пучка с высоким содержанием моды Гаусса–Эрмита (1,0) при приложении управляющего напряжения.

### Заключение

В работе создан дифракционный оптический элемент на основе пластины сегнетоэлектрика ниобата лития со статической доменной структурой заданной геометрии, предназначенный для скоростной модуляции поперечно-модового состава пучка, формируемого из освещающего Гауссова пучка лазера. Показано, что приложение к элементу напряжения 3400 В приводит к преобразованию проходящего Гауссова пучка в пучок с распределением интенсивности, соответствующим моде Гаусса–Эрмита (0,1). Незначительное отклонение величины полуволнового напряжения от опубликованного ранее отнесено за счет наличия остаточного деполаризующего поля в переключенной области образца.

В дальнейшем авторами предполагается создание модулируемых элементов, предназначенных для формирования пучков с более сложным модовым со-

ставом, в том числе пучков с орбитальным угловым моментом (ОУМ).

Рассмотренный подход может быть использован при построении систем оптической связи в свободном пространстве с поперечно-модовой мультиплексацией [24].

### Благодарности

Использовано оборудование уральского ЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№18-29-20077 мк).

### Литература

1. **Keiser, G.E.** A review of WDM technology and applications / G.E. Keiser // *Optical Fiber Technology*. – 1999. – Vol. 56, Issue 1. – P. 3-39. – DOI: 10.1006/ofte.1998.0275.
2. **Berdagué, S.** Mode division multiplexing in optical fibers / S. Berdagué, P. Facq // *Applied Optics*. – 1982. – Vol. 21, Issue 11. – P. 1950-1955. – DOI: 10.1364/AO.21.001950.
3. **Golub, M.A.** Spatial phase filters matched to transverse modes / M.A. Golub, S.V. Karpeev, N.L. Kazanskii, A.V. Mirzov, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer, G.V. Uvarov // *Soviet Journal of Quantum Electronics*. – 1988. – Vol. 18, No. 3. – P. 392-393. – DOI: 10.1070/QE1988v018n03ABEH011528.
4. **Soifer, V.** Laser beam mode selection by computer generated holograms / V. Soifer, M. Golub. – Boca Raton: CRC Press, 1994. – ISBN: 978-0-8493-2476-5.
5. **Duparre, M.R.** Generation, superposition and separation of Gauss-Hermite modes by means of DOEs / M.R. Duparre, V.S. Pavelyev, B. Ludge, B. Kley, V.A. Soifer, R. Kowarschik // *Proceedings of SPIE*. – 1998. – Vol. 3291. – P. 104-114. – DOI: 10.1117/12.310573.
6. **Карпеев, С.В.** Интерференционная схема для генерации поляризационно-неоднородного лазерного излучения с использованием пространственного модулятора света / С.В. Карпеев, В.В. Подлипов, А.М. Алгубили // *Компьютерная оптика*. – 2020. – Т. 44, № 2. – С. 214-218. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-698.
7. **Gavrilov, A.V.** Integrated fiber-based transverse mode converter / A.V. Gavrilov, V.S. Pavelyev // *Computer Optics*. – 2017. – Vol. 41(4). – P. 510-514. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-4-510-514.
8. *Computer design of diffractive optics* / ed. by V.A. Soifer. – Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012. – ISBN: 978-1-84569-635-1.
9. **Karpeev, S.V.** DOE-aided analysis and generation of transverse coherent light modes in a stepped-index optical fiber / S.V. Karpeev, V.S. Pavelyev, M. Duparre, B. Luedge, C. Rockstuhl, S. Schroeter // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. – 2003. – Vol. 12, No. 1. – P. 27-34.
10. **Чайка, А.Н.** Оптически управляемый жидкокристаллический модулятор с дифракционной эффективностью 50% и высоким разрешением / А.Н. Чайка, Л.П. Амосова, Е.А. Коншина // *Письма в журнал технической физики*. – 2009. – № 35(9). – С. 25-30.
11. **Пат. 2459223 Российская Федерация G02F 1/137.** Жидкокристаллический пространственно-временной модулятор света на основе комплекса полиимид-квантовые точки ряда CdSe(ZnS), CdS/ZnS, InP/ZnS для дисплейной, телевизионной техники и систем переключения лазерного излучения / Каманина Н.В., Шурпо Н.А., Васильев П.Я.; правообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Научно-производственная корпорация "Государственный опти-
- ческий институт им. С.И. Вавилова" (ФГУП "НПК ГОИ им. С.И. Вавилова"); № 2011127294/04, заявл. 01.07.2011, опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23. – 8 с.: ил.
12. **Родин, В.Г.** Некогерентный голографический коррелятор на основе микрозеркального модулятора / В.Г. Родин // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, № 3. – С. 347-353. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-347-353.
13. **Евтихийев, Н.Н.** Высокоскоростная оперативная реализация голографических и дифракционных элементов с применением микрозеркальных пространственно-временных модуляторов света / Н.Н. Евтихийев, Е.Ю. Злоказов, В.В. Краснов, В.Г. Родин, Р.С. Стариков, П.А. Черёмхин // *Квантовая электроника*. – 2020. – Т. 50, № 7. – С. 667-674.
14. **Карпеев, С.В.** Экспериментальное исследование возможности применения полупроводниковых лазеров в системе оптической связи с модовым уплотнением каналов / С.В. Карпеев, В.С. Павельев, В.А. Сойфер, М. Дюпарре, Б. Людге // *Компьютерная оптика*. – 1999. – № 19. – С. 112-114.
15. **Cudney, R.** Electrically controlled Fresnel zone plates made from ring-shaped 180 degrees domains / R. Cudney, L. Ríos, H. Escamilla // *Optics Express*. – 2004. – Vol. 12, Issue 23. – P. 5783-5788. – DOI: 10.1364/oe.12.005783.
16. **Bain, A.K.** *Ferroelectrics: Principles and applications* / A.K. Bain, P. Chand. – Weinheim: John Wiley & Sons, 2017.
17. **Karpeev, S.V.** Anisotropic diffractive optical element for generating hybrid-polarized beams / S.V. Karpeev, V.V. Podlipnov, S.N. Khonina, V.D. Parantin, K.N. Tukmakov // *Optical Engineering*. – 2019. – Vol. 58, Issue 8. – 082402. – DOI: 10.1117/1.OE.58.8.082402.
18. **Карпеев, С.В.** Четырёхсекторный преобразователь поляризации, интегрированный в кристалл кальцита / С.В. Карпеев, В.В. Подлипов, С.Н. Хонина, В.Д. Паранин, А.С. Решетников // *Компьютерная оптика*. – 2018. – Т. 42, № 3. – С. 401-407. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-401-407.
19. **Khonina, S.N.** Formation of hybrid higher-order cylindrical vector beams using binary multi-sector phase plates / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, S.A. Fomchenkov, A.P. Porfirev // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8. – 14320. – DOI: 10.1038/s41598-018-32469-0.
20. **Khonina, S.N.** Generation of cylindrical vector beams of high orders using uniaxial crystals / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, S.V. Alferov, V.A. Soifer // *Journal of Optics*. – 2015. – Vol. 17, Issue 6. – 065001. – DOI: 10.1088/2040-8978/17/6/065001.
21. **Shur, V.Ya.** Micro- and nano-domain engineering in lithium niobate / V.Ya. Shur, A.R. Akhmatkhanov, I.S. Baturin // *Applied Physics Reviews*. – 2015. – Vol. 2, Issue 4. – 040604. – DOI: 10.1063/1.4928591.
22. **de Angelis, M.** Two-dimensional mapping of electro-optic phase retardation in lithium niobate crystals by digital holography / M. de Angelis, S. de Nicola, A. Finizio, G. Pierattini, P. Ferraro, S. Grilli, M. Paturzo, L. Sansone, D. Alfieri, P. De Natale // *Optics Letters*. – 2005. – Vol. 30, Issue 17. – P. 1671-1673. – DOI: 10.1364/OL.30.001671.
23. **Das, R.** Enhanced electro-optic property in LiNbO<sub>3</sub> by electric field domain inversion / R. Das, R. Chakraborty // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2013. – Vol. 25, Issue 16. – P. 1626-1629. – DOI: 10.1109/LPT.2013.2272954.
24. **Ndagano, B.** Comparing mode-crosstalk and mode-dependent loss of laterally displaced orbital angular momentum and Hermite-Gaussian modes for free-space optical communication / B. Ndagano, N. Mphuthi, G. Milione, A. Forbes // *Optics Letters*. – 2017. – Vol. 42, Issue 20. – P. 4175-4178. – DOI: 10.1364/OL.42.004175.

---

**Сведения об авторах**

**Есин Александр Андреевич**, 1991 года рождения, окончил Уральский федеральный университет имени Первого президента России Б.Н. Ельцина по специальности «Нанотехнологии и микросистемная техника». Работает младшим научным сотрудником в лаборатории сегнетоэлектриков. Область научных интересов: техника физического эксперимента, кинетика роста доменов в сегнетоэлектриках. E-mail: [alexander.esin@urfu.ru](mailto:alexander.esin@urfu.ru).

**Ахматханов Андрей Ришатович**, 1986 года рождения, кандидат физ.-мат. наук, в 2007 году окончил Уральский государственный университет им. А.М. Горького (ныне – Уральский федеральный университет имени Первого президента России Б.Н. Ельцина) по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния», работает старшим научным сотрудником института естественных наук и математики УрФУ. Область научных интересов: физика сегнетоэлектриков, кинетика доменной структуры сегнетоэлектриков, методы создания регулярных доменных структур. E-mail: [andrey.akhmatkhanov@urfu.ru](mailto:andrey.akhmatkhanov@urfu.ru).

**Павельев Владимир Сергеевич**, 1970 года рождения, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой наноинженерии Самарского университета; главный научный сотрудник Института систем обработки изображений РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная микрооптика и оптические волноводы, нанофотоника и синтез оптических метаматериалов, технологии формирования микро- и наноструктур. E-mail: [nano@ssau.ru](mailto:nano@ssau.ru).

**Шур Владимир Яковлевич**, 1945 года рождения, профессор, доктор физ.-мат. наук, окончил Уральский государственный университет имени А.М. Горького (ныне – Уральский федеральный университет имени Первого президента России Б.Н. Ельцина). Работает главным научным сотрудником института естественных наук и математики УрФУ, директором центра коллективного пользования «Современные нанотехнологии» УрФУ. Область научных интересов: нанотехнологии, физика сегнетоэлектриков и сопутствующих материалов, доменная структура сегнетоэлектриков. E-mail: [vladimir.shur@urfu.ru](mailto:vladimir.shur@urfu.ru).

---

ГРНТИ: 29.19.35, 29.33.17

Поступила в редакцию 22 июля 2020 г. Окончательный вариант – 3 февраля 2021 г.

---

---

# Tunable LiNbO<sub>3</sub>-based diffractive optical element for the control of transverse modes of a laser beam

A.A. Esin<sup>1</sup>, A.R. Akhmatkhanov<sup>1</sup>, V.S. Pavelyev<sup>2,3</sup>, V.Y. Shur<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, 620000, Ekaterinburg, Russia, Lenina 51,

<sup>2</sup> IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, 443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151,

<sup>3</sup> Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34

## Abstract

A diffractive optical element based on a nonlinear-optical ferroelectric single crystal has been proposed, synthesized, and experimentally characterized. The element allows fast modulation of transverse modes of a Gaussian laser beam.

**Keywords:** electro-optical modulator, ferroelectric, lithium niobate, domain structure, transverse mode content.

**Citation:** Esin AA, Akhmatkhanov AR, Pavelyev VS, Shur VY. Tunable LiNbO<sub>3</sub>-based diffractive optical element for the control of transverse modes of the laser beam. *Computer Optics* 2021; 45(2): 222-226. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-786.

**Acknowledgements:** The equipment of the Ural Center for Shared Use “Modern nanotechnology” UrFU was used. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 18-29-20077 mk).

## References

- [1] Keiser GE. A review of WDM technology and applications. *Opt Fiber Technol* 1999; 5(1): 3-39. DOI: 10.1006/ofte.1998.0275.
  - [2] Berdagué S, Facq P. Mode division multiplexing in optical fibers. *Appl Opt* 1982; 21(11): 1950-1955. DOI: 10.1364/AO.21.001950.
  - [3] Golub MA, Karpeev SV, Kazanskiĭ NL, Mirzov AV, Siskayan IN, Soifer VA, Uvarov GV. Spatial phase filters matched to transverse modes. *Sov J Quantum Electron* 1988; 18(3): 392-393. DOI: 10.1070/QE1988v018n03ABEH011528.
  - [4] Soifer V. Golub M. Laser beam mode selection by computer generated holograms. Boca Raton: CRC Press, 1994. ISBN: 978-0-8493-2476-5.
  - [5] Duparre MR, Pavelyev VS, Ludge B, Kley B, Soifer VA, Kowarschik R. Generation, superposition and separation of Gauss-Hermite modes by means of DOEs. *Proc SPIE* 1998; 3291: 104-114. DOI: 10.1117/12.310573.
  - [6] Karpeev SV, Podlipnov VV, Algubili AM. An interference scheme for generating inhomogeneously polarized laser radiation using a spatial light modulator. *Computer Optics* 2020; 44(2): 214-218. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-698.
  - [7] Gavrillov AV, Pavelyev VS. Integrated fiber-based transverse mode converter. *Computer Optics* 2017; 41(4): 510-514. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-4-510-514.
  - [8] Soifer VA, ed. *Computer design of diffractive optics*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited; 2012. ISBN: 978-1-84569-635-1.
  - [9] Karpeev SV, Pavelyev VS, Duparre M, Luedge B, Rockstuhl C, Schroeter S. DOE-aided analysis and generation of transverse coherent light modes in a stepped-index optical fiber. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)* 2003; 12(1): 27-34.
  - [10] Chayka AN, Amosova LP, Konshina EA. Optically controlled liquid crystal modulator with 50% diffraction efficiency [In Russian]. *Technical Physics Letters* 2009; 35(9): 25-30.
  - [11] Kamanina NV, Shurpo NA, Vasil'ev PJa. Liquid-crystal space-time modulator of light based on complex of polyimidequantum points of row CdSe(ZnS), CdS/ZnS, InP/ZnS for display, television equipment and systems of laser radiation switching. Pat RF of Invent N 2459223 of August 20, 2012, Russian Bull of Inventions N23, 2012.
  - [12] Rodin VG. A non-coherent holographic correlator based on a digital micromirror device. *Computer Optics* 2018; 42(3): 347-353. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-347-353
  - [13] Evtikhiev NN, Zlokazov EYu, Krasnov VV, Rodin VG, Starikov RS, Cheremkhin PA. High-speed implementation of holographic and diffraction elements using digital micromirror devices. *Quantum Electronics* 2020; 50(7): 667-674. DOI: 10.1070/QEL17295.
  - [14] Karpeev SV, Pavelyev VS, Soifer VA, Duparre MR, Ludge B. Experimental study of semiconductor lasers application in optical communication system with a mode compression [In Russian]. *Computer Optics* 1999; 19: 112-114.
  - [15] Cudney R, Ríos L, Escamilla H. Electrically controlled Fresnel zone plates made from ring-shaped 180 degrees domains. *Opt Express* 2004; 12(23): 5783-5788. DOI: 10.1364/opex.12.005783.
  - [16] Bain AK, Chand P. *Ferroelectrics: Principles and applications*. Weinheim: John Wiley & Sons; 2017.
  - [17] Karpeev SV, Podlipnov VV, Khonina SN, Paranin VD, Tukmakov KN. Anisotropic diffractive optical element for generating hybrid-polarized beams. *Opt Eng* 2019; 58(8): 082402. DOI: 10.1117/1.OE.58.8.082402.
  - [18] Karpeev SV, Podlipnov VV, Khonina SN, Paranin VD, Reshetnikov AS. A four sector polarization converter integrated in a calcite crystal. *Computer Optics* 2018; 42(3): 401-407. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-401-407
  - [19] Khonina SN, Ustinov AV, Fomchenkov SA, Porfirev AP. Formation of hybrid higher-order cylindrical vector beams using binary multi-sector phase plates. *Sci Rep* 2018; 8: 14320. DOI: 10.1038/s41598-018-32469-0.
-

- [20] Khonina SN, Karpeev SV, Alferov SV, Soifer VA. Generation of cylindrical vector beams of high orders using uniaxial crystals. *J Opt* 2015; 17(6): 065001. DOI: 10.1088/2040-8978/17/6/065001.
- [21] Shur VYa, Akhmatkhanov AR, Baturin IS. Micro- and nano-domain engineering in lithium niobate. *Appl Phys Rev* 2015; 2(4): 040604. DOI: 10.1063/1.4928591.
- [22] de Angelis M, de Nicola S, Finizio A, Pierattini G, Ferraro P, Grilli S, Paturzo M, Sansone L, Alfieri D, De Natale P. Two-dimensional mapping of electro-optic phase retardation in lithium niobate crystals by digital holography. *Opt Lett* 2005; 30(13): 1671-1673. DOI: 10.1364/OL.30.001671.
- [23] Das R, Chakraborty R. Enhanced electro-optic property in LiNbO<sub>3</sub> by electric field domain inversion. *IEEE Photon Technol Lett* 2013; 25: 1626-1629. DOI: 10.1109/LPT.2013.2272954.
- [24] Ndagano B, Mphuthi N, Milione G, Forbes A. Comparing mode-crosstalk and mode-dependent loss of laterally displaced orbital angular momentum and Hermite–Gaussian modes for free-space optical communication. *Opt Lett* 2017; 42(20): 4175-4178. DOI: 10.1364/OL.42.004175.

### Authors' information

**Alexander Andreevich Esin** born in 1991, graduated from Ural Federal University majoring in Nanotechnology. Currently he works as the junior researcher in Ferroelectric laboratory of Ural Federal University. Research interests are experimental physics and ferroelectric domain kinetics. E-mail: [alexander.esin@urfu.ru](mailto:alexander.esin@urfu.ru).

**Andrey Rishatovich Akhmatkhanov** born in 1986, PhD, graduated from Ural State University (now Ural Federal University) in 2007. He works as the senior researcher in the School of Natural Sciences and Mathematics of Ural Federal University. Research interests: ferroelectrics physics, domain structure kinetics, methods of creation of periodical domain structures. E-mail: [andrey.akhmatkhanov@urfu.ru](mailto:andrey.akhmatkhanov@urfu.ru).

**Vladimir Sergeevich Pavelyev** (b. 1970). Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Head of Nanoengineering department of Samara University, principal researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: diffractive microoptics, optical waveguides, nanophotonics, optical metamaterials synthesis, technologies for forming of micro- and nanostructures. E-mail: [nano@ssau.ru](mailto:nano@ssau.ru).

**Vladimir Yakovlevich Shur** born in 1945, professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, graduated from Ural State University (now – Ural Federal University). He works as the chief scientific researcher of the School of Natural Sciences and Mathematics of the Ural Federal University, the director of Ural Center for Shared Use “Modern Nanotechnology” of the Ural Federal University. Research interests: nanotechnology, physics of ferroelectrics and related materials, domain structure of ferroelectrics. E-mail: [vladimir.shur@urfu.ru](mailto:vladimir.shur@urfu.ru).

*Received July 22, 2020. The final version – February 3, 2021.*